

ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD DE ULTRASONIDOS EN PROBETAS DE HORMIGÓN CON DISTINTOS GRADOS DE HUMEDAD

¹ José Antonio Benítez-Herreros; ² Dr. Alfonso Cobo Escamilla; ³ Dra. Esther Moreno Fernández

¹ Ingeniero de la Edificación, Arquitecto Técnico. josan.benher@gmail.com

² Dr. Ingeniero Industrial, Arquitecto, Arquitecto Técnico. Departamento de Tecnología de la Edificación, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid. Grupo de Investigación UPM: Patología de Estructuras, Protecciones Colectivas y Medios Auxiliares de Edificación. alfonso.cobo@upm.es

³ Dra. en Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Licenciada en Ciencias Químicas. Departamento de Construcciones Arquitectónicas y su Control, E.U. Arquitectura Técnica de Madrid. esther.moreno@upm.es

Palabras Clave: Hormigón; Velocidad de propagación por ondas ultrasónicas; Resistencia a compresión.

Resumen

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en el mundo de la construcción y la ingeniería a lo largo de la Historia. El comportamiento y las propiedades de este material a lo largo del tiempo son objeto de numerosos estudios debido a las características monolíticas y mecánicas que presenta y a la abundancia de sus componentes en la naturaleza. [1]

Se ha realizado un estudio experimental sobre probetas cúbicas de hormigón en masa (dimensiones: 10x10x10 cm) de la evolución de la velocidad de propagación de ultrasonidos (US) a través del hormigón y el grado en que afectan distintas variables a dicha velocidad, y su posible relación con su resistencia a compresión.

Se han fabricado 32 probetas con hormigón H-25, tomando dos dosificaciones diferentes en cuanto a la relación agua/cemento (A/C) ($A/C=0,5$ y $A/C=0,6$), y empleando dos tipos distintos de árido grueso.

Sobre dichas probetas se han llevado a cabo medidas periódicas de velocidad de propagación de US y del grado de humedad que adquieren durante el tiempo de curado en cámara húmeda y durante su endurecimiento en ambiente de laboratorio hasta su rotura a compresión. También se las sometió a ensayos de rotura a compresión con el fin de determinar posibles dependencias entre la resistencia a rotura adquirida y la máxima deformación experimentada con dicha velocidad de propagación y contenido de humedad. [2] [3]

Una vez realizados los ensayos, se puede observar un comportamiento respecto a la velocidad de propagación a través del hormigón. El ambiente al que se expone el hormigón es determinante a la hora de establecer correlaciones entre la velocidad y el contenido de humedad.

En cuanto a la fase de ensayos destructivos, se observa una evolución frente a esfuerzos de compresión similar, presentando una resistencia y un límite elástico un 16% aproximadamente superior en el hormigón con menor cantidad de humedad (relación $A/C=0,5$).

Introducción

En este trabajo se ha estudiado la evolución de la velocidad de propagación de US en probetas fabricadas con distintos tipos de hormigón en masa. Los objetivos que se pretenden obtener con este trabajo son:

- Obtención de los principales factores que determinan la velocidad de propagación de ultrasonidos en hormigón.
- Análisis de la posible correlación lineal entre la velocidad de propagación y el peso de las muestras ensayadas atendiendo a factores como las condiciones de fabricación y de almacenamiento.
- Estudio de la influencia del empleo de distintas dosificaciones y materiales durante la fabricación del hormigón en la velocidad de transmisión de ondas acústicas y en la resistencia a rotura por compresión del material.

Materiales y técnicas empleadas

Para dar respuesta a los objetivos mencionados, se han realizado 32 probetas cúbicas de dimensiones 10x10x10 cm, dimensión mínima establecida en ensayos de medida directa mediante US [2] de hormigón en masa H-25 (material que presenta una resistencia característica a compresión a los 28 días de 25 N/mm²), puesto que es el empleado más comúnmente en edificación. [4]

En el proceso de fabricación se han introducido dos variables: por un lado, dos dosificaciones diferentes en cuanto a la relación A/C (A/C=0,5 y A/C=0,6), y por otro, se han empleado dos tipos distintos de árido grueso: procedente de pórfido granítico de machaqueo (TM=15mm); y procedente de canto rodado (TM=10mm). (Tabla 1)

Tabla 1: Distribución de las probetas por su composición.

TIPO PROBETA		RELAC. A/C	TIPO DE ÁRIDO	NÚMERO PROBETAS
P1	P1.1 – P1.8	0,5	MACHAQUEO	8
P2	P2.1 – P2.4	0,5	RODADO	4
P3	P3.1 – P3.4	0,5	MACHAQUEO	4
P4	P4.1 – P4.4	0,5	MACHAQUEO	4
P5	P5.1 – P5.8	0,6	RODADO	8
P6	P6.1 – P6.4	0,6	MACHAQUEO	4

Dispositivo experimental

Durante la fase de Ensayos No Destructivos (END) se han realizado medidas periódicas del grado de humedad que han ido tomando con el paso del tiempo las muestras objeto de estudio, al igual que medidas del tiempo de paso de ondas de US a través del hormigón siguiendo la normativa vigente [2], con un equipo de ensayo de US “Ibertest, modelo E-46”. [5] [6]

Además de las condiciones de fabricación iniciales que establecidas en la ejecución de las muestras, se pueden distinguir dos periodos en los que las condiciones ambientales cambian:

- Durante el periodo de curado, en cámara húmeda ($T^a=25^{\circ}\text{C}$; $\text{HR}=99\%$).
- Durante el tiempo de endurecimiento, en ambiente laboratorio, en condiciones normales ($T^a=21^{\circ}\text{C}$; $\text{HR}\approx 30\%$).

A partir de estos datos obtenidos, se realiza para cada amasada de hormigón fabricada un estudio de la posible correlación entre la evolución de la velocidad ultrasónica y el grado de humedad para relacionarlo con el grado de humedad.

Para la obtención de la velocidad, se emplea la siguiente expresión:

$$(1) \quad V = \frac{L \times 10^3}{T}$$

Siendo V la velocidad de propagación (m/s), L la longitud entre palpadores (mm) y T el tiempo que tarda el impulso de un palpador al otro (s).

Una vez realizados los END, se ha continuado con la fase de Ensayos Destructivos (ED) mediante la rotura de las probetas, con el objetivo de observar posibles correlaciones con la composición que tiene cada tipo de hormigón y la velocidad de transmisión de ultrasonidos en cada probeta, de acuerdo con la normativa vigente al respecto. [2] [3]

Los ED se han realizado por Rotura a Compresión empleando una máquina universal “Ibertest, modelo MIB-60/AM”, con un control de ensayos por carrera en todos los casos. En los ensayos sobre probetas cúbicas, la velocidad de carga fue de 1 mm/min . Alcanzado el punto de máxima deformación la máquina determina la carga máxima de rotura, obteniéndose la tensión máxima de rotura de la probeta. La máquina universal registra la carga máxima de rotura (KN) y la resistencia del hormigón (MPa).

Resultados

Se han realizado los ensayos mencionados sobre 32 probetas cúbicas de hormigón en masa H-25. La fase de END ha tenido lugar durante los 120 primeros días desde la fabricación del hormigón, tras los cuales se ha resuelto la fase de ED. A continuación se muestran los resultados experimentales y analíticos alcanzados, representando gráficamente (figuras 1 a 7) los relativos al estudio de un solo tipo de probetas.

Respecto a la evolución de la velocidad de propagación de US, en el conjunto de las probetas, se diferencian dos secciones. Durante el proceso de curado del hormigón, en cámara húmeda, que van absorbiendo rápidamente humedad y aumentando su peso; y durante el proceso de endurecimiento, en ambiente de laboratorio, en que pierde levemente humedad. (Figuras 1, 2)

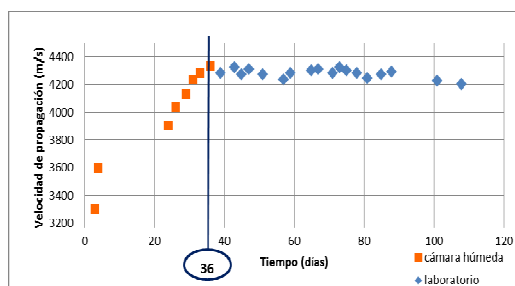


Fig. 1: Evolución de la velocidad de propagación de US en el hormigón para la probeta P1.1.

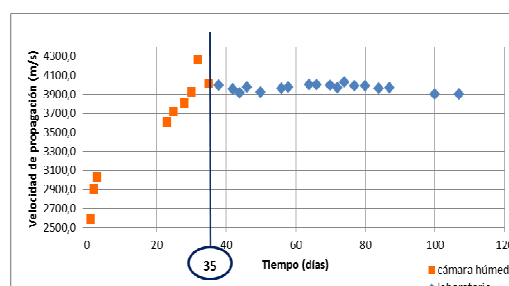


Fig. 2: Evolución de la velocidad de propagación de US en el hormigón para la probeta P5.1.

La medida del grado de absorción de humedad experimentado a lo largo del tiempo, da resultados bien diferenciados según el ambiente al que está expuesto el material. En cámara húmeda absorbe gran cantidad de humedad mientras que en ambiente de laboratorio ésta apenas se pierde. Se observa un mayor grado de absorción y pérdida relativa de humedad interior en aquellas probetas que poseen una relación A/C mayor (P5, P6). El tipo de árido empleado no influye en los datos medidos. (Figura 3)

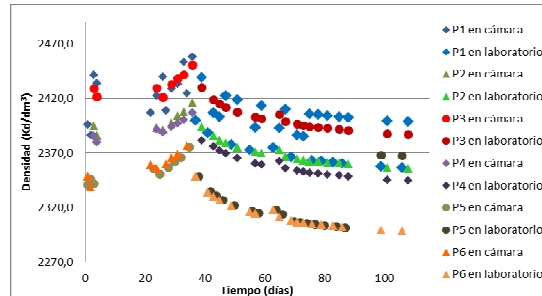


Fig. 3: Evolución de la densidad del hormigón en las probetas tipo P1 a P6.

Se ha estudiado analíticamente la posible relación lineal existente entre la velocidad de propagación de US medida en laboratorio con el grado de humedad y la composición del hormigón fabricado mediante regresión simple (al 95% de confianza). En el periodo de curado del hormigón en cámara húmeda existe correlación lineal entre el peso que presentan las probetas y la velocidad de propagación de US debido a la gran variación que experimenta ésta en un rango de pesos de probeta no muy grande. Durante el endurecimiento, por contra, no hay correlación lineal durante el endurecimiento ya que apenas varía. (Figuras 4, 5)

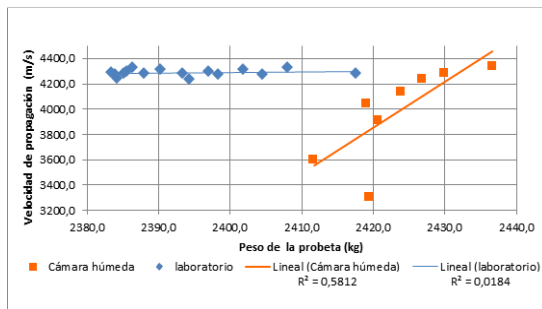


Fig. 4: Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P1.1.

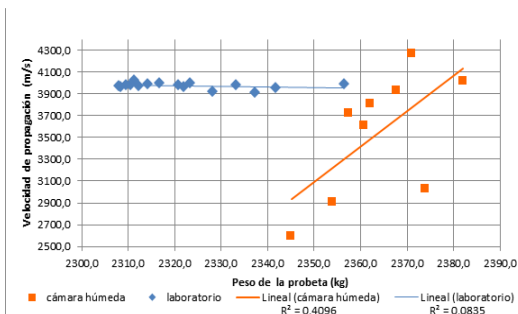


Fig. 5: Relación de la velocidad de propagación en función del peso de la probeta P5.1.

De los ensayos de rotura a compresión de las muestras se han obtenido los valores característicos de las piezas examinadas de los que se observa una mayor carga de rotura a compresión en las probetas con relación A/C menor (P1, P2, P3, P4), en torno a los 350-400 KN, mientras que el hormigón fabricado con mayor proporción de humedad (P5, P6) se sitúa entre 300 y 350 KN, un 16% superior aproximadamente. (Figuras 6, 7)

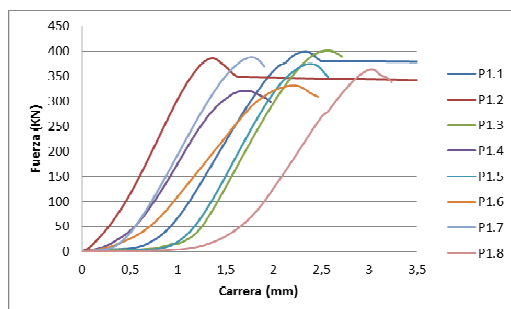


Fig. 6: Diagrama Carga-Deformación de Ensayo de rotura a compresión de las probetas tipo P1.

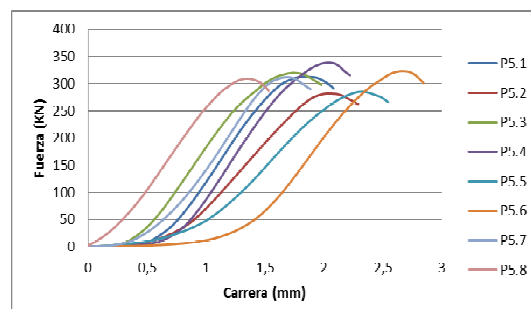


Fig. 7: Diagrama Carga-Deformación de Ensayo de rotura a compresión de las probetas tipo P5.

Atendiendo al tipo de árido grueso empleado los resultados no muestran diferencias de comportamiento de probetas con la misma dosificación pero con distinto árido. (Tablas 2, 3)

Tabla 2: Valores de carga, deformación y tensión durante el ensayo a compresión de las probetas tipo P1.

PROB.	CARGA LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMA ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P1.1	351,87	35,19	1,93	398,83	39,88	2,33
P1.2	335,81	33,58	1,07	385,96	38,60	1,36
P1.3	312,34	31,23	2,05	401,04	40,10	2,57
P1.4	274,40	27,44	1,29	321,08	32,11	1,72
P1.5	338,74	33,87	2,09	374,64	37,46	2,39
P1.6	291,88	29,19	1,78	331,59	33,16	2,21
P1.7	349,15	34,92	1,49	388,36	38,84	1,77
P1.8	319,86	31,99	2,73	363,81	36,38	3,03

Tabla 3: Valores de carga, deformación y tensión durante el ensayo a compresión de las probetas tipo P5.

PROB.	CARGA LÍMITE ELÁSTICO (KN)	TENSIÓN LÍMITE ELÁSTICO (N/mm ²)	CARRERA LÍMITE ELÁSTICO (mm)	CARGA MÁXIMO ROTURA (KN)	TENSIÓN MÁXIMA ROTURA (N/mm ²)	CARRERA CARGA MÁXIMA (mm)
P5.1	265,73	26,57	1,48	312,66	31,17	2,08
P5.2	254,68	25,47	1,78	281,79	28,18	2,29
P5.3	253,28	25,33	1,34	319,70	31,97	1,98
P5.4	286,01	28,60	1,65	338,86	33,89	2,22
P5.5	252,53	25,25	2,00	285,42	28,64	2,54
P5.6	267,96	26,80	2,26	323,10	32,31	2,84
P5.7	168,70	16,87	1,40	311,69	31,17	1,89
P5.8	256,05	25,61	1,00	309,02	30,90	1,53

Conclusiones

Tras llevar a cabo toda la metodología experimental desarrollada y el consiguiente análisis e interpretación de los resultados, se alcanzan las siguientes conclusiones:

- Durante el proceso de curado en cámara húmeda, la evolución que desarrollan el peso y la velocidad presenta poca estabilidad, aunque existe una gran correlación lineal entre ambas variables. Ésta no se da en el periodo de endurecimiento, en condiciones ambientales normales, debido a la escasa variación de la velocidad de propagación de ondas acústicas respecto de la densidad.
- El grado de absorción y pérdida de humedad es ligeramente superior para dosificaciones con mayor cantidad de agua.
- Relaciones A/C más bajas ofrecen resistencias de rotura mayores. Mientras, el empleo de áridos procedentes de machaqueo mejora muy levemente éstos valores respecto de la utilización de áridos rodados.

- La velocidad de propagación de US, como era de esperar, se ve influenciada, en igualdad de condiciones, por el ambiente al que están sometidas las muestras, principalmente.

Agradecimientos: Este trabajo forma parte del Trabajo Fin de Máster titulado con el mismo nombre, realizado para el Máster en Innovación Tecnológica en Edificación [7] ha sido desarrollado íntegramente en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la E. U. de Arquitectura Técnica de Madrid. Sin la colaboración del responsable y del personal del mismo no hubiera sido posible.

REFERENCIAS

- [1] Moreno Fernández, E. Corrosión de armaduras de estructuras de hormigón: estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras de hormigón corroídas aplicando el criterio de acero equivalente. Tesis Doctoral UC3M – 2008
- [2] UNE-EN 12504. Ensayos de hormigón en estructuras. AENOR – 2006
- [3] UNE-EN 12390. Ensayos de hormigón endurecido. AENOR – 2001
- [4] EHE 08. Ministerio de Fomento – 2008
- [5] Ramírez Gómez, F; et al. Métodos de Ensayos no Destructivos – 1996
- [6] Malholtra, V.M.; Carino, N.J. Handbook of Nondestructive Testing of Concrete – 1994
- [7] Benítez Herreros, J.A. Estudio de la evolución de la velocidad de ultrasonidos en probetas de hormigón con distintos grados de humedad. Archivo Digital UPM, ID Code: 9060 – 2011.
- [8] Fernández Cánovas, M. Hormigón - 2007